Op-amp's als digitale schakelingen

Als u niet al te hoge eisen stelt aan de frequentie kunt u standaard op-amp's op een eenvoudige manier gebruiken voor het samenstellen van digitale schakelingen.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 06-02-2025

Inleidende begrippen

Waarom digitaal?
U kunt zich de vraag stellen waarom u digitale schakelingen zou opbouwen met typische analoge onderdelen als operationele versterkers. Er staat immers een keur aan digitale IC's ter beschikking waarmee u alle denkbare digitale functies en schakelingen kunt samenstellen. Toch kan het in de praktijk soms handig zijn een operationele versterker in te zetten als bijvoorbeeld een eenvoudige digitale poort. Zeker als u gebruik maakt van de moderne viervoudige op-amp's kan het in een schakeling voorkomen dat u een of meerdere op-amp's over houdt. Als u dan net één poortje of multivibrator nodig hebt kunt u deze economisch opbouwen rond een van de vrije operationele versterkers.

Snelheidsbeperkingen
Uiteraard kleven er aan het gebruik van operationele versterkers in digitale schakelingen bepaalde beperkingen. Op de eerste plaats zijn de standaard op-amp's uiteraard veel en veel trager dan digitale IC's uit de TTL- of de CMOS-familie. U kunt dus niet verwachten dat u met een op-amp een multivibrator kunt maken die werkt bij een frequentie van 1 MHz! Maar dat hoeft niet altijd een bezwaar te zijn. Zo wordt er vaak een flip-flop gebruikt om het denderen van drukknop schakelaars te onderdrukken. In een dergelijke laagfrequente toepassing kunt u zonder bezwaar de noodzakelijke flip-flop opbouwen rond een op-amp.

Niveaubeperkingen
Op de tweede plaats is het niet mogelijk digitale schakelingen, uitgevoerd met operationele versterkers, zonder meer te koppelen aan TTL- of CMOS-IC's. Deze schakelingen werken immers met zeer nauw gedefinieerde spanningsgrenzen voor de 'L'- en de 'H'-niveau's. Digitale schakelingen die met op-amp's zijn uitgevoerd zullen in de meeste gevallen op de uitgang schakelen tussen de positieve en de negatieve voedingsspanning van de schakeling. Die laatste is dodelijk voor digitale IC's! Die negatieve spanning kunt u echter gemakkelijk onderdrukken door op de uitgang van de op-amp een silicium-diode aan te sluiten die de negatieve spanning afleidt naar de massa (*lees verder*).

Stijg- en daaltijden
Maar zelfs als u er in slaagt de spanningsniveaus compatibel te maken, dan zouden er nog problemen kunnen ontstaan met de stijg- en daaltijden van de pulsen. Omdat operationele versterkers slechte slew-rates hebben springen de uitgangsspanningen vrij langzaam van 'L' naar 'H' en vice versa. Deze stijg- en daaltijden zijn zo groot dat digitale IC's deze niet zonder meer accepteren. Soms moet u een schmitt-trigger tussenschakelen.

Niet alles is mogelijk
Tot slot kunt u maar een zeer beperkt aantal digitale schakelingen rond operationele versterkers opbouwen. Het heeft uiteraard geen zin een op-amp te gebruiken als u behalve

dat ene IC nog een handvol passieve onderdelen nodig hebt! Dan is het veel zinvoller een echte digitale schakeling te gebruiken.

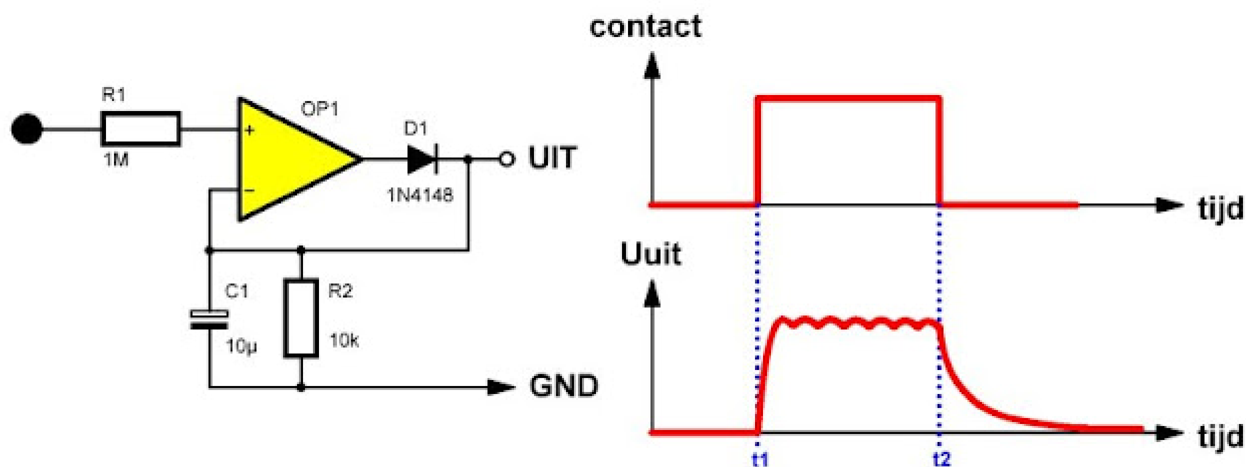
Wat aan de orde komt
In de volgende paragrafen worden schakelingen besproken waarmee u een operationele versterker zonder al te veel externe onderdelen kunt gebruiken voor het opbouwen van:

- Een digitale tiptoets.
- Een digitale poort.
- Een logische decoder.
- Een pulsvertrager.
- Een flip-flop.
- Een monostabiele multivibrator.
- Een pulsvertrager.
- Een astabiele multivibrator.

De op-amp als digitale tiptoets

Inleiding
Een tiptoets is de elektronische vervanger voor de traditionele mechanische drukknop. Een tiptoets bestaat uit één of twee contacten, die met een vinger aangeraakt moet(en) worden. De schakeling reageert door het opwekken van een stuurpuls, waarmee u een of andere functie van het apparaat kunt inschakelen.
Tiptoetsen werken volgens verschillende systemen. Naast resistieve en capacitieve heeft men ook tiptoetsen die reageren op de wisselspanning die in ieder mens aanwezig is. De ruimte om ons heen zit immers vol elektromagnetische velden, bijvoorbeeld afkomstig van het alom aanwezige 230 V net, die in het menselijke lichaam een wisselspanning genereren. Deze spanning is zelfs vrij hoog, maar is uiteraard niet in staat stroom te leveren. Wilt u deze spanning detecteren, dan is het noodzakelijk de tiptoets af te sluiten met een zeer hoge weerstand. In de traditionele benadering worden hiervoor CMOS-schakelingen gebruikt. Door het aanraken van de ingang van een CMOS-poort zal op deze ingang een 50 Hz wisselspanning geïntroduceerd worden, die groot genoeg is om de poort vijftig keer per seconde van 'L' naar 'H' te sturen en vice versa.
Op de uitgang van de poort ontstaat dus een blokspanning met een frequentie van 50 Hz en dit signaal kunt u gelijkrichten zodat een mooie stuurspanning ontstaat.

De op-amp schakeling
Moderne operationele versterkers met FET-ingangen hebben een ingangsimpedantie die vergelijkbaar is met deze van CMOS-poorten. Het ligt dus voor de hand dat zij ideaal zijn voor het opbouwen van een tiptoets. Het praktische schema is getekend in de onderstaande figuur.
Deze schakeling gaat er van uit dat de op-amp gevoed wordt tussen de massa en een positieve voedingsspanning. De niet-inverterende ingang van de op-amp is via een beveiligingsweerstand van 1 MΩ verbonden met de enkelvoudige tiptoets. De inverterende ingang gaat via de parallelschakeling van een condensator C1 en een weerstand R2 naar de massa. Tussen de uitgang en de inverterende ingang is een silicium diode D1geschakeld.



Het praktische schema van een tiptoets schakeling met een op-amp.
(© 2025 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling
De werking van de schakeling wordt toegelicht aan de hand van de rechter grafieken in de bovenstaande figuur. Als u de tiptoets niet aanraakt zal de uitgang van de schakeling laag zijn. In de grafiek is aangegeven dat dit 0 V is, maar bij sommige operationele versterkers die de negatieve voedingspen aan de massa hebben liggen zal de spanning op ongeveer 1,5 V blijven hangen. Operationele versterkers zoals de bekende 741 hebben namelijk de eigenschap dat de uitgang nooit volledig tot tegen de negatieve voedingsspanning uitgestuurd kan worden.
Raakt u de tiptoets met een vinger aan, dan zal er op de niet-inverterende ingang van de op-amp een 50 Hz wisselspanning verschijnen met een top-tot-top waarde van ongeveer 10 V. Het gevolg is dat op de uitgang van de op-amp een spanning verschijnt met een frequentie van 50 Hz met als topwaarde een tamelijk hoge positieve spanning. De niet-inverterende ingang van de op-amp wordt immers 50 keer per seconde positiever dan de inverterende ingang. De schakeling streeft ernaar het spanningsverschil tussen beide ingangen nul te maken. Dat kan alleen als de uitgang van de op-amp positief wordt. De diode D1 gaat geleiden, met als gevolg dat de condensator C1 positief wordt opgeladen.
Op de uitgang van de schakeling verschijnt dus een positieve puls. Als de spanning op de niet-inverterende ingang negatief wordt zal de schakeling proberen ook nu het spanningsverschil tussen beide ingangen nul de maken. De uitgang van de op-amp gaat dus naar de massa, de diode D1 gaat sperren en de uitgang van de schakeling blijft toch staan op de positieve spanning die over de condensator C1 staat. De weerstand R2 over de elco C1 is noodzakelijk om dit onderdeel snel te ontladen als u de tiptoets weer loslaat.

Besluit
Als u de tiptoets aanraakt verschijnt op de uitgang van de schakeling een positieve puls, die u zonder meer kunt gebruiken voor het aansturen van andere schakelingen of het activeren van bepaalde functies.

De op-amp als digitale poort

Inleiding
Poorten zijn de basisschakelingen van de digitale techniek. In sommige schakelingen hebt u poorten nodig die de logische vergelijking *'ALS... DAN...'* helpen oplossen. Er zijn natuurlijk tal van TTL- of CMOS-IC's beschikbaar die vol poorten zitten. Maar ook nu geldt dat er vaak een operationele versterker over is die u kunt gebruiken voor het samenstellen van een poort. Maar met de bekende beperking: frequentiebereik niet groter dan enkele tientallen kHz! Vaak is dat voor een praktische schakeling in of om uw huis geen enkel probleem.

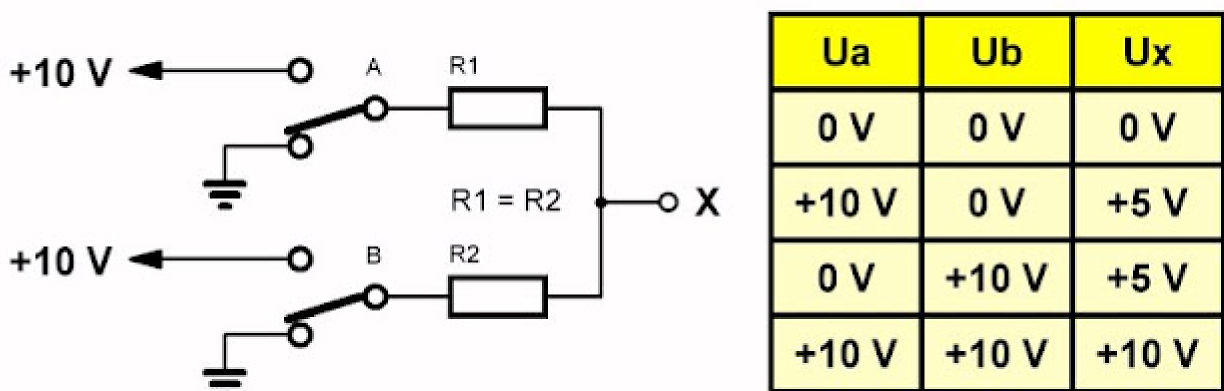
Vier basispoorten
Voor de duidelijkheid zijn de vier basispoorten '*AND*', '*NAND*', '*OR*' en '*NOR*' samengevat in de tabel van de onderstaande figuur. In deze tabel wordt het verband gegeven tussen de logische niveaus op de twee ingangen A en B van de poort en op de uitgang van de poort. 'H' staat hierbij uiteraard voor een positieve spanning en 'L' voor het massa-potentiaal.

INGANGEN		UITGANG			
A	B	AND	NAND	OR	NOR
L	L	L	H	L	H
H	L	L	H	H	L
L	H	L	H	H	L
H	H	H	L	H	L
		&	&	≥1	≥1

De vier basispoorten met hun waarheidstabellen.
(© 2025 Jos Verstraten)

Het principe
De vier poorten kunnen met een en dezelfde schakeling uitgevoerd worden. Het enige dat u naast de operationele versterker nodig hebt zijn vier weerstanden. De werking van de schakeling berust op het optellen van de spanningen op de twee ingangen van de poort en het resultaat van deze optelling vergelijken met een drempelspanning. In de voorbeelden wordt uitgegaan van logische spanningen met de onderstaande logische niveaus:
- 'L'= 0 V
- 'H' = +10 V

Maar uiteraard kunt u deze spanningen aan de door de praktijk gegeven waarden aanpassen.
Het basis-principe is geschetst in de onderstaande figuur. De twee ingangen A en B van de poortschakeling zijn verbonden met twee even grote weerstanden R1 en R2 die in serie zijn geschakeld. Het knooppunt X van de weerstandsdeler gaat naar een ingang van de als comparator geschakelde op-amp. De spanning op punt X is afhankelijk van de spanningen op de twee ingangen A en B.



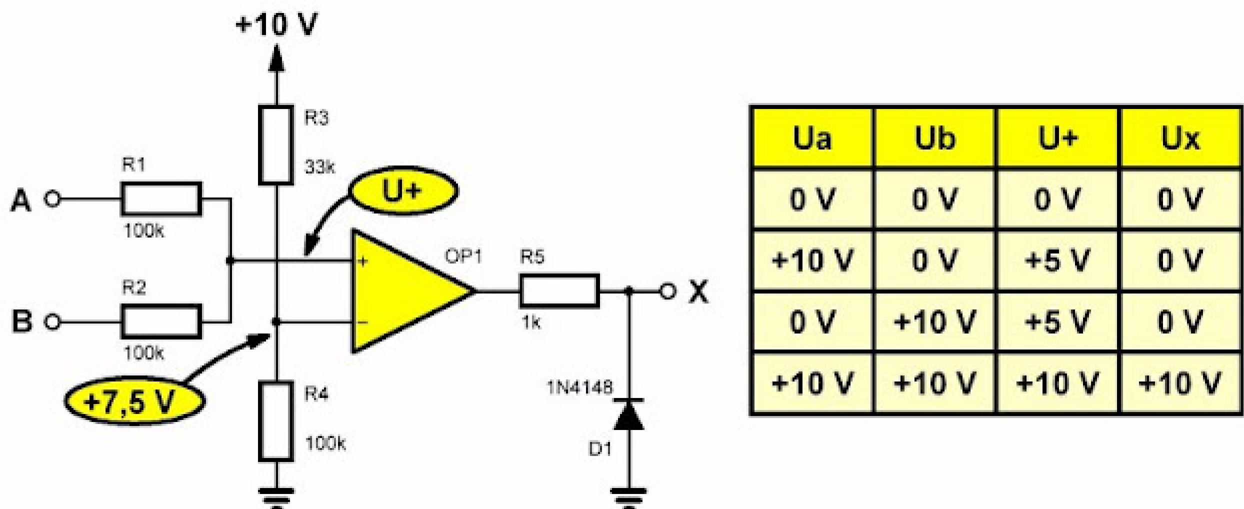
Ua	Ub	Ux
0 V	0 V	0 V
+10 V	0 V	+5 V
0 V	+10 V	+5 V
+10 V	+10 V	+10 V

Het basis-principe van de poortwerking van een operationele versterker.
(© 2025 Jos Verstraten)

Als beide ingangen 'L' zijn zal de spanning op punt X uiteraard 0 V bedragen. Is een van de ingangen 'H' en de andere 'L', dan ontstaat er een spanningsdeler tussen 0 V en +10 V, met als gevolg dat het knooppunt X op een spanning van +5 V staat. Zijn beide ingangen 'H', dan zal ook het punt X op een spanning van +10 V staan.
Door de spanning op punt X te vergelijken met een bepaalde drempelwaarde ontstaat de logische werking van de schakeling. Het soort poort dat nagemaakt moet worden bepaalt de

grootte van de drempelspanning, maar ook met welke ingangen van de comparator het punt X en de drempelspanning verbonden moeten worden.
In de praktische schakelingen die in de volgende paragraafjes besproken worden, wordt uitgegaan van een operationele versterker die symmetrisch gevoed wordt tussen +10 V en -10 V. Om het niveau van de logische 'L' op 0 V vast te leggen, wordt er steeds een silicium-diode geschakeld tussen de uitgang van de op-amp en de massa. Deze zal ervoor zorgen dat de spanning op de uitgang van de op-amp nooit lager kan worden dan -0,65 V, de geleidingsspanning van de diode. Deze waarde wordt als 'L' aanvaard.

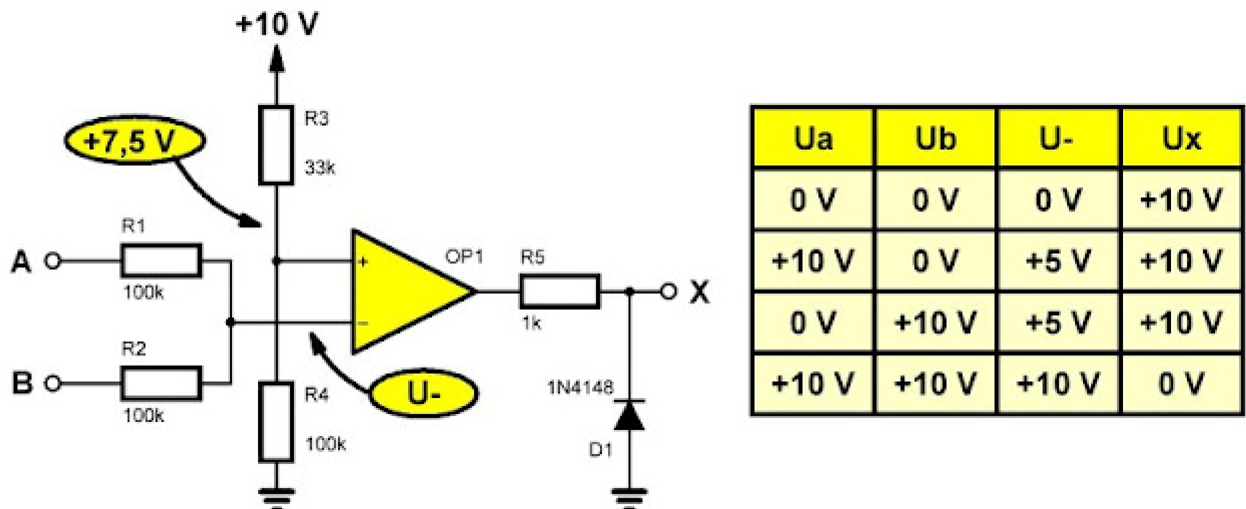
De AND-poort
Het basisschema van een op-amp als AND-poort is getekend in de onderstaande figuur. De twee ingangen worden via de twee spanningsdeler-weerstanden aangesloten op de niet-inverterende ingang van de comparator. De inverterende ingang wordt via de spanningsdeler R3/R4 aangesloten op een drempelspanning van +7,5 V. Deze drempelwaarde is alleen van toepassing als u werkt met de vooropgestelde logische niveaus van 0 V en +10 V!
De werking van de schakeling zal duidelijk zijn. Als beide ingangen 'L' zijn, staat de niet-inverterende ingang op een spanning van 0 V. De spanning op de inverterende ingang is groter, de uitgang van de schakeling gaat naar 0 V, dus naar 'L'.
Is een van de ingangen 'H', dan staat er op de niet-inverterende ingang een spanning van +5 V. Deze is nog steeds kleiner dan de spanning op de inverterende ingang, met als gevolg dat er aan de uitgang niets verandert.
Als beide ingangen 'H' zijn, dan staat de niet-inverterende ingang op een spanning van +10 V. Deze spanning is groter dan de spanning op de inverterende ingang, met als gevolg dat de comparator omklapt en een hoge uitgang levert.
De werking van de schakeling voldoet dus aan de waarheidstabel van een AND-poort.



Ua	Ub	U+	Ux
0 V	0 V	0 V	0 V
+10 V	0 V	+5 V	0 V
0 V	+10 V	+5 V	0 V
+10 V	+10 V	+10 V	+10 V

Het praktische schema van een AND-poort. (© 2025 Jos Verstraten)

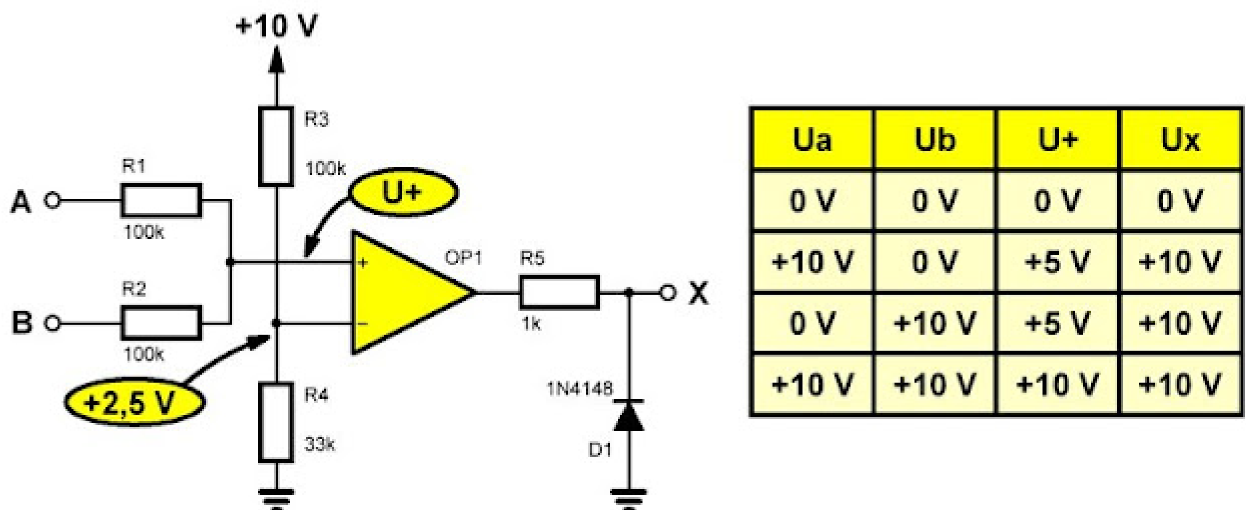
De NAND-poort
Het praktische schema van een NAND-poort is getekend in de onderstaande figuur. Het enige verschil met de AND-poort is dat beide ingangen van de comparator zijn omgewisseld. De niet-inverterende ingang van de op-amp staat nu op een drempelspanning van +7,5 V, de inverterende ingang gaat naar het knooppunt van de spanningsdeler.
Zolang niet beide ingangen 'H' zijn, zal de spanning op de inverterende ingang lager zijn dan de spanning op de niet-inverterende ingang. De uitgang van de op-amp is 'H'. Eerst als beide ingangen 'H' worden slaat de comparator om en levert een 'L' aan de uitgang.



Ua	Ub	U-	Ux
0 V	0 V	0 V	+10 V
+10 V	0 V	+5 V	+10 V
0 V	+10 V	+5 V	+10 V
+10 V	+10 V	+10 V	0 V

Het praktische schema van een NAND-poort. (© 2025 Jos Verstraten)

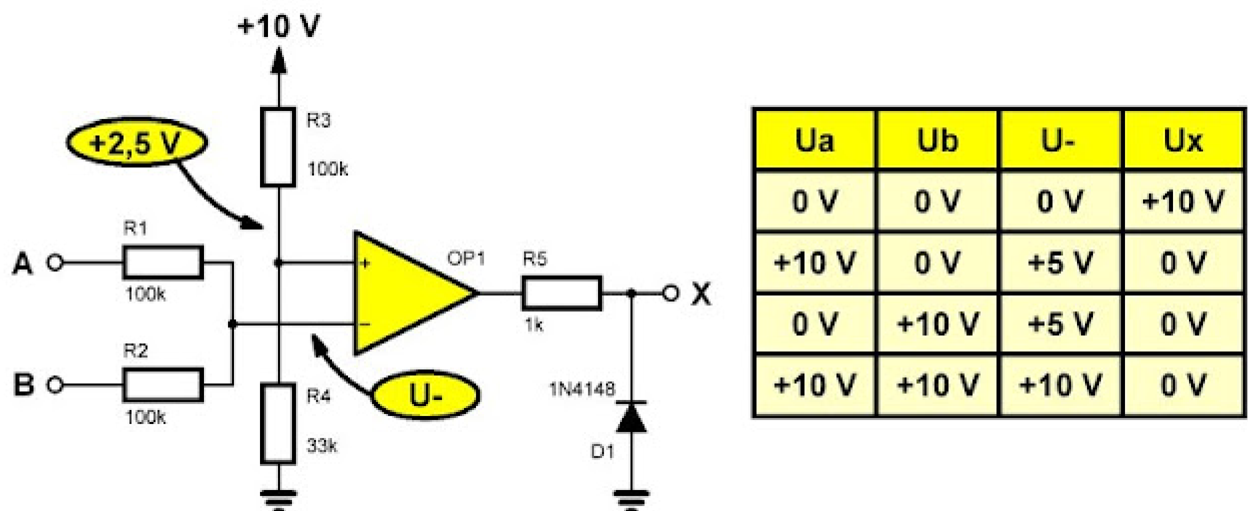
De OR-poort
Het al even eenvoudige schema van een OR-poort is getekend in de onderstaande figuur. Beide ingangen gaan nu weer naar de niet-inverterende ingang, de inverterende ingang wordt ingesteld op een drempel van +2,5 V. Het is nu voldoende dat er op één ingang een 'H' verschijnt om de spanning op de niet-inverterende ingang groter te laten worden dan de spanning op de inverterende ingang. De comparator klapt om, de uitgang wordt 'H'. Hetgeen volledig overeen komt met de waarheidstabel van de OR-functie.



Ua	Ub	U+	Ux
0 V	0 V	0 V	0 V
+10 V	0 V	+5 V	+10 V
0 V	+10 V	+5 V	+10 V
+10 V	+10 V	+10 V	+10 V

Het praktische schema van een OR-poort. (© 2025 Jos Verstraten)

De NOR-poort
Het zal duidelijk zijn dat het volstaat de twee ingangen van de op-amp om te wisselen, zoals geschetst in onderstaande figuur. Alleen als beide ingangen 'L' zijn staat er op de inverterende ingang een spanning die lager is dan de spanning op de niet-inverterende ingang. De uitgang is dan 'H' en gaat naar 'L' als een van de ingangen 'H' wordt.



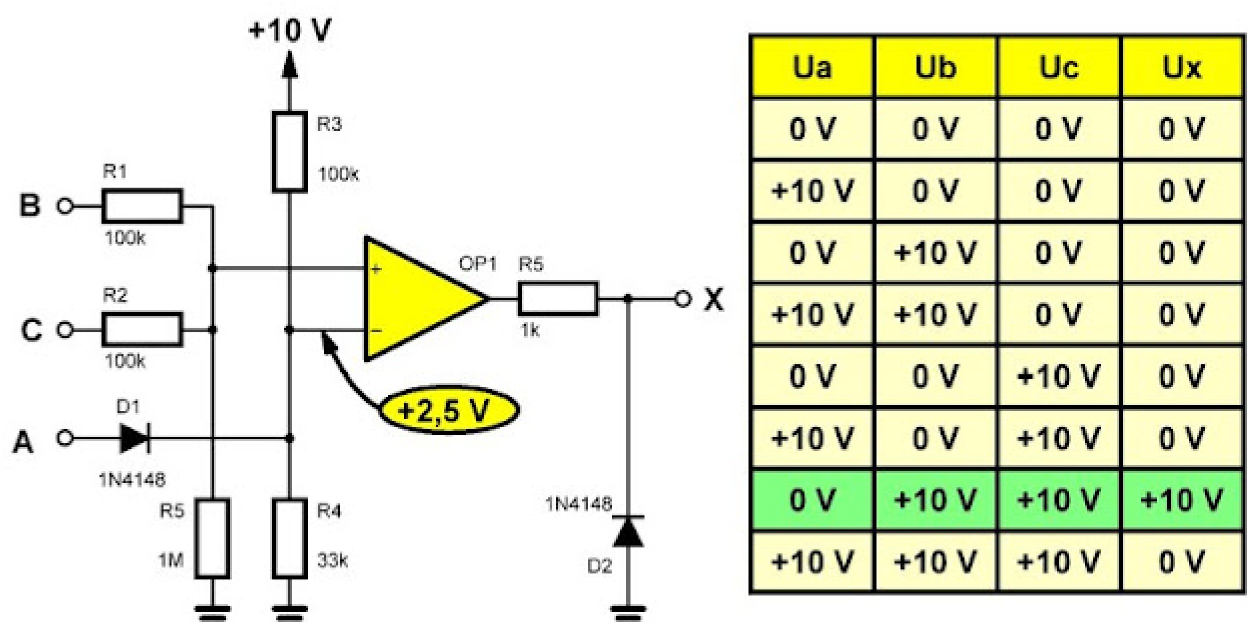
Ua	Ub	U-	Ux
0 V	0 V	0 V	+10 V
+10 V	0 V	+5 V	0 V
0 V	+10 V	+5 V	0 V
+10 V	+10 V	+10 V	0 V

Het praktische schema van een NOR-poort. (© 2025 Jos Verstraten)

De op-amp als logische decoder

Wat is een logische decoder?
Logische decoders zijn schakelingen waarmee u bepaalde logische voorwaarden kunt decoderen. De schakeling levert een 'H' op de uitgang als aan de logische voorwaarden wordt voldaan. Een typische logische voorwaarde is: '*Alleen als de spanning op punt A = 'H' én de spanning op punt B = 'L' én de spanning op punt C = 'H', mag de uitgang X 'H' worden'*. Logische decoders kunnen uiteraard met standaard poorten uitgevoerd worden. Er bestaat daarvoor zelfs een speciale wiskunde, de '*Boolse algebra*'. Maar vaak zult u in de praktijk merken dat een logische vergelijking veel eenvoudiger met één of hoogstens twee operationele versterkers opgelost kan worden.

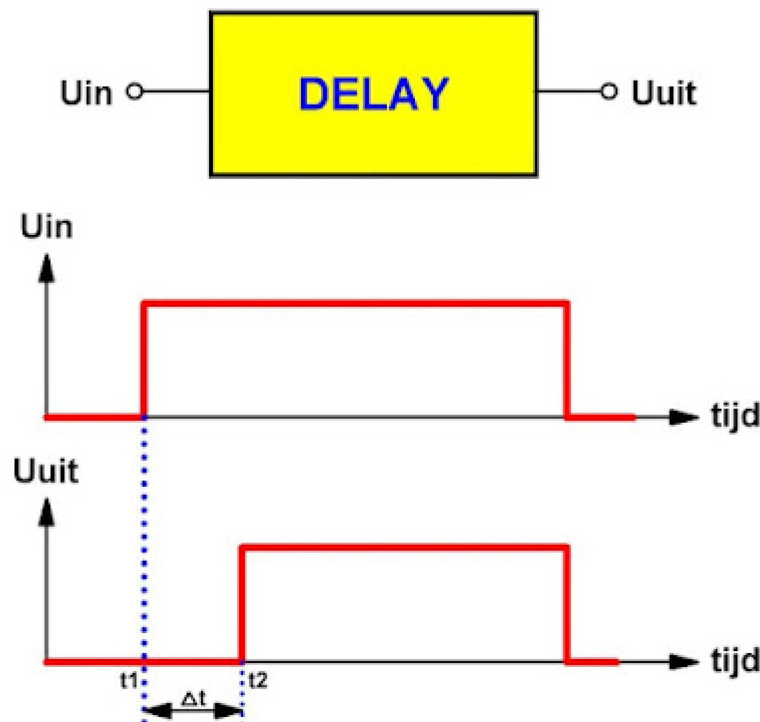
Een voorbeeld
Als voorbeeld is in de onderstaande figuur een logische decoder getekend, die voldoet aan de logische voorwaarde:
'*De uitgang X mag alleen 'H' zijn als A = 'L', B = 'H' en C = 'H'*.
Met de verstrekte basiskennis moet het voor iedere lezer(es) zonder problemen mogelijk zijn om de geldigheid van de schakeling te controleren. Merk op hoe u, door het in de vergelijking betrekken van de drempelspanning, vaak de schakeling kunt vereenvoudigen!



Ua	Ub	Uc	Ux
0 V	0 V	0 V	0 V
+10 V	0 V	0 V	0 V
0 V	+10 V	0 V	0 V
+10 V	+10 V	0 V	0 V
0 V	0 V	+10 V	0 V
+10 V	0 V	+10 V	0 V
0 V	+10 V	+10 V	+10 V
+10 V	+10 V	+10 V	0 V

De op-amp als pulsvertrager (delay)

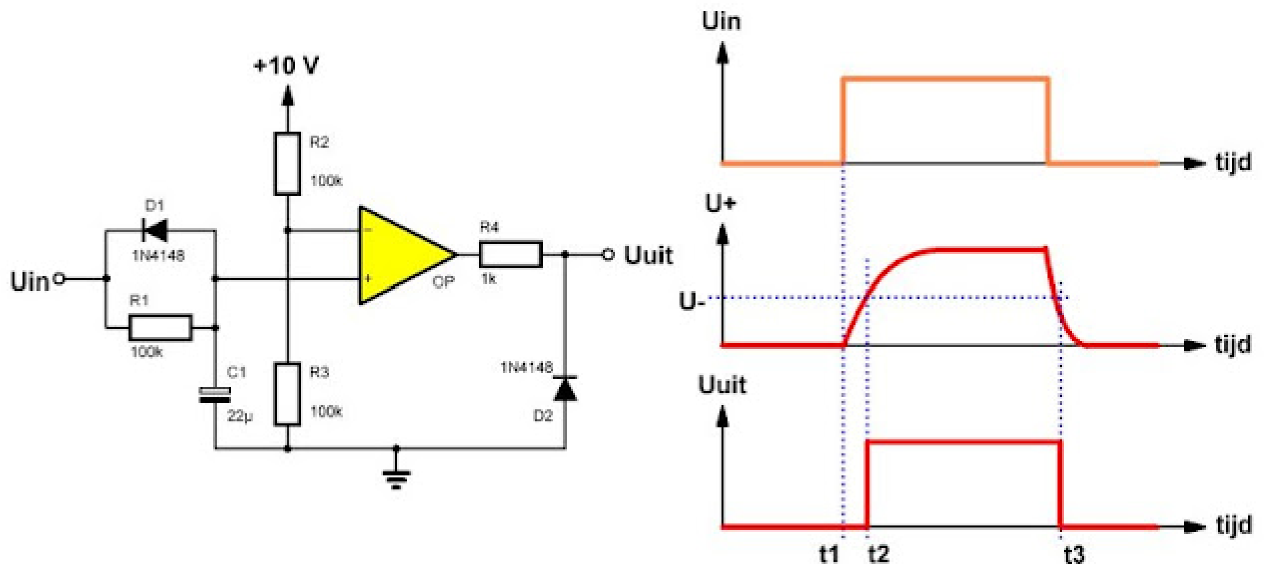
Inleiding
Vertragingen worden in allerlei schakelingen toegepast. Een typisch voorbeeld is een inbraakalarm, waar u na het omzetten van de activeringssleutel 30 seconden tijd hebt om uw huis te verlaten.
Een dergelijke vertraging wordt verzorgd door een vertragingsschakeling. Daar bestaan speciale digitale schakelingen voor, zoals de 74121 (TTL) of de 4047 (CMOS). Dat zijn monostabiele multivibratoren, die door de externe bedrading als vertrager worden geschakeld. Maar ook nu kunt u een dergelijke schakeling vaak heel eenvoudig vervangen door een op-amp.
Het basisprincipe van een pulsvertrager (delay) is geschetst in de onderstaande figuur. De delay zorgt ervoor dat de voorflank van de ingangspuls over een bepaalde, instelbare tijd Δt wordt vertraagd. De uitgangspuls verdwijnt op het moment dat de ingangspuls weer naar 'L' gaat. Dat is de eenvoudigste vorm van elektronische vertraging, maar ook deze die het meest in de praktijk wordt toegepast.



Het principe van een eenvoudige elektronische pulsvertrager.
(© 2025 Jos Verstraten)

De op-amp schakeling
Een dergelijke vertrager kunt u met een operationele versterker ontwerpen volgens het schema van de onderstaande figuur. Ook nu wordt de op-amp ingezet als comparator. De inverterende ingang wordt ingesteld op de helft van de positieve voedingsspanning door middel van de spanningsdeler R2/R3. Tussen de ingang van de schakeling en de niet-inverterende ingang van de op-amp is een RC-netwerkje opgenomen. De weerstand R1 wordt overbrugd door een silicium diode D1.
Als de ingangsspanning 'L' is staat de niet-inverterende ingang van de op-amp op 0 V. Deze spanning is lager dan de spanning op de inverterende ingang (+5 V), het gevolg is dat de uitgang 'L' is. Op tijdstip t_1 wordt de ingang 'H'. Er gaat nu een stroom door de weerstand R1 vloeien, die de condensator C1 langzaam gaat opladen. Op tijdstip t_2 wordt de spanning over de condensator gelijk aan +5 V. De comparator klapt om, zijn uitgang wordt 'H'.

De vertraging van de schakeling is dus afhankelijk van de snelheid waarmee de condensator C1 oplaadt tot +5 V. Deze snelheid is uiteraard in te stellen door de waarde van R1 en C1 aan te passen.
Op het moment t_3 gaat de ingangsspanning weer naar 'L'. De diode D1 gaat nu geleiden, met als gevolg dat de condensator C1 vrijwel onmiddellijk wordt ontladen. De spanning op de niet-inverterende ingang van de op-amp zakt onder de +5 V drempel, de comparator slaat om en de uitgang van de op-amp gaat weer naar 'L'.



Het praktische schema van een vertrager met een operationele versterker.
(© 2025 Jos Verstraten)

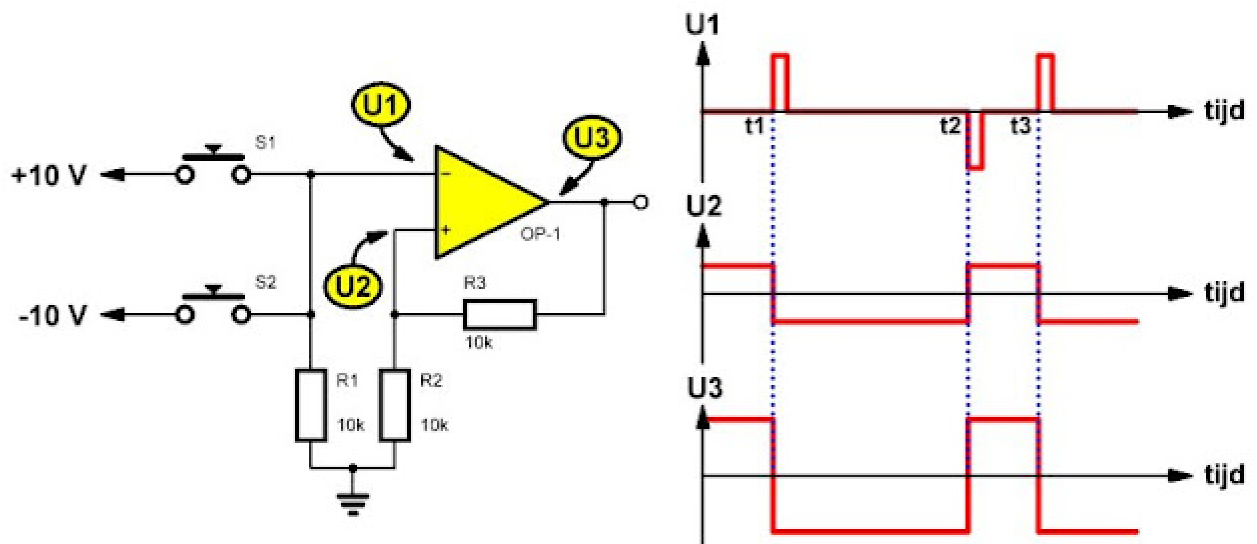
Voordelen van de op-amp schakeling
De schakeling met operationele versterker heeft als groot voordeel dat er absoluut geen sprake is van storingsgevoeligheid. Dat kan van TTL- of CMOS-schakelingen niet gezegd worden! Vaak is het bij dergelijke schakelingen voldoende dat er even een stoorpulsje op de voeding komt om de monostabiele multivibrator te activeren. De vertrager wekt dan een ongewenst pulsje op.
Een ander voordeel is dat de ingangsweerstand van moderne FET op-amp's zeer hoog is. U kunt dan een kleine condensator gebruiken in het vertragingsnetwerk en deze laden met een grote weerstand. Met deze schakeling zijn vertragingstijden tot meer dan een uur te bereiken. Natuurlijk is het dan wel noodzakelijk dat ook de ingangspuls gedurende deze tijd aanwezig blijft.

De op-amp als flip-flop

Inleiding
Flip-flop's zijn er in alle soorten en maten. De meest gebruikte zijn de type-RS, de type-D en de type-JK. De type-RS flip-flop is de meest eenvoudige. Deze schakeling heeft twee ingangen, een Set en een Reset. Legt u aan de Set een smalle puls, dan wordt de Q-uitgang van de flip-flop 'H'. Deze situatie blijft bestaan tot u een pulsje zet op de Reset. De Q-uitgang van de flip-flop wordt dan 'L' en blijft dat tot er weer een pulsje op de Set verschijnt.
Ondanks de eenvoud van deze schakeling zijn er tal van toepassingen te bedenken waarbij zo'n schakeling van pas komt. Om maar weer het voorbeeld van het inbraakalarm van stal te halen: een type-RS flip-flop kan gebruikt worden om het alarm te resetten.
De Set-puls wordt geleverd door het systeem, nadat een van de alarmmelders onraad heeft bespeurd. De Reset-puls wordt geleverd door de eigenaar van het alarm, die door middel van een impulssleutel het alarm weer uitschakelt.

De op-amp methode

Een type-RS flip-flop kunt u heel eenvoudig samenstellen met een operationele versterker. Voorwaarde is wél dat de schakeling symmetrisch gevoed wordt en dat de ene puls positief is en de andere negatief kan zijn. De positieve puls kunt u zonder probleem ergens uit de schakeling afleiden, de negatieve puls kunt u natuurlijk door een drukknopje rechtstreeks uit de negatieve voedingsspanning van de schakeling halen.
Het praktische schema van de schakeling is getekend in de onderstaande figuur.



Het basisschema van de type-RS flip-flop. (© 2025 Jos Verstraten)

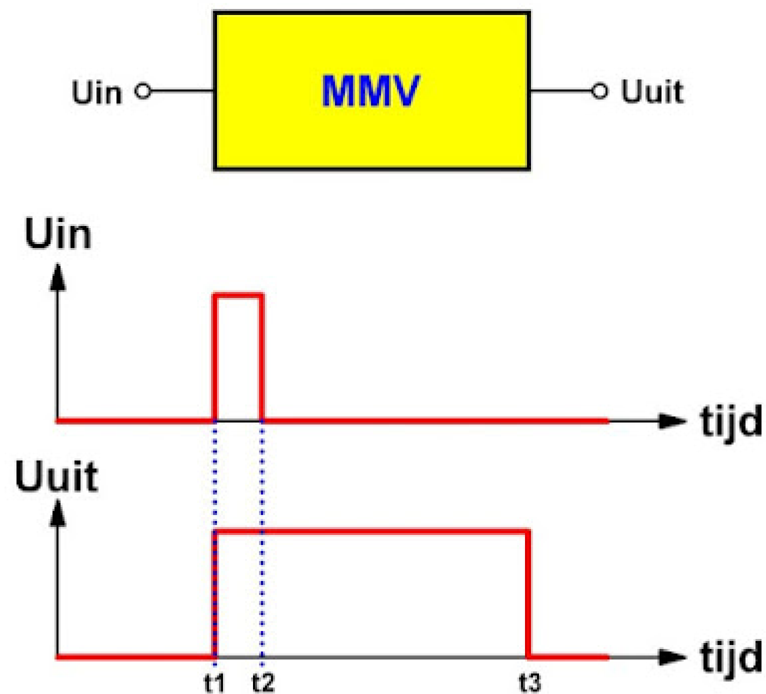
De werking van de schakeling
Stel dat na het inschakelen van de voedingsspanning de uitgangsspanning van de op-amp 'H' is. De uitgang is via de spanningsdeler R2/R3 verbonden met de niet-inverterende ingang. Omdat beide weerstanden even groot zijn zal deze ingang worden ingesteld op een spanning van +5 V. De inverterende ingang ligt aan de massa. De spanning op de inverterende ingang is dus lager dan de spanning op de niet-inverterende ingang, het klopt dus inderdaad dat de uitgang bij het inschakelen van de voeding 'H' wordt.
Op tijdstip t_1 drukt u op de drukknop S1. De inverterende ingang wordt nu +10 V, met als gevolg dat deze ingang op een hogere spanning komt te staan dan de niet-inverterende ingang. De uitgangsspanning van de op-amp schakelt naar de negatieve voedingsspanning. Ook deze spanning wordt teruggekoppeld naar de niet-inverterende ingang, met als gevolg dat dit punt op een spanning van -5 V komt te staan. Als u de drukknop S1 loslaat, zal er niets veranderen op de uitgang van de schakeling. De inverterende ingang gaat naar de massa, maar dat is nog steeds positiever dan de -5 V op de andere ingang. De uitgang van de schakeling blijft dus op -10 V staan.
Op tijdstip t_2 drukt u op de schakelaar S2. De inverterende ingang komt op -10 V te staan, een meer negatieve spanning dan deze op de niet-inverterende ingang. Het gevolg is dat de op-amp zijn uitgang naar +10 V stuurt. Deze spanning wordt teruggekoppeld. De niet-inverterende ingang komt op +5 V te staan. De schakeling is weer terug in de eerste stabiele toestand.

Besluit
De uitgangsspanning van de schakeling heeft twee stabiele standen, +10 V en -10 V. De schakeling komt in een van de stabiele standen terecht na een korte druk op een van de drukknoppen. De typische werking van een type-RS flip-flop!

De op-amp als monostabiele multivibrator (MMV)

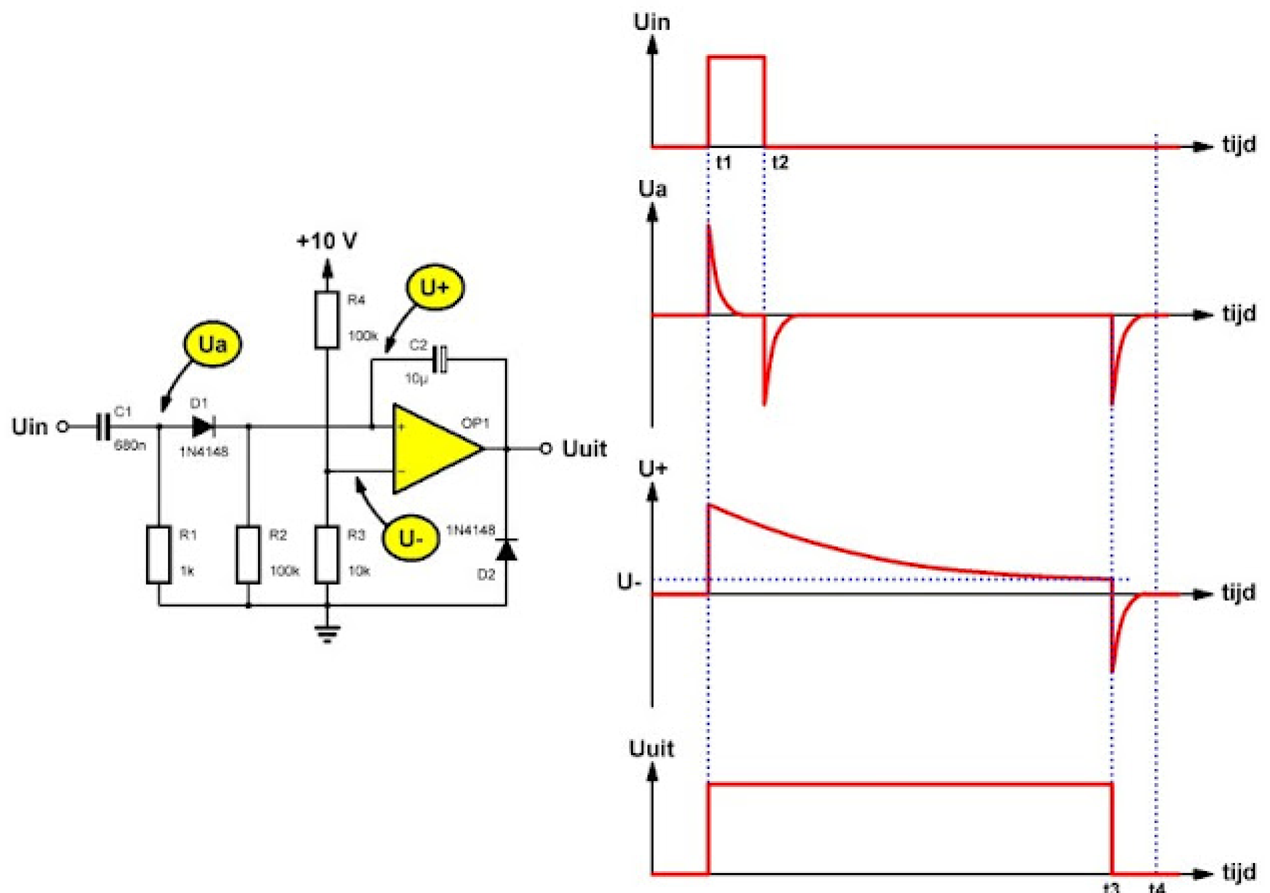
Inleiding

Een monostabiele multivibrator (MMV) is, zie de onderstaande figuur, een schakeling die na het verschijnen van een ingangspuls met willekeurige duur een uitgangspuls genereert waarvan de duur constant is. De pulsbreedte t_1-t_3 van de uitgangspuls is volledig onafhankelijk van de pulsbreedte t_1-t_2 van de ingangspuls. De breedte van de uitgangspuls is in de meeste gevallen in te stellen door een weerstand- of condensator-waarde aan te passen.



Het principe van een monostabiele multivibrator.
(© 2025 Jos Verstraten)

De schakeling met een op-amp
Het praktische schema van een MMV met een operationele versterker is getekend in de onderstaande figuur. De inverterende ingang wordt ingesteld op een kleine positieve spanning door middel van de spanningsdeler R3/R4. De niet-inverterende ingang gaat via de weerstand R2 rechtstreeks naar de massa en staat dus in rust op 0 V. Het gevolg is dat de uitgang in rust op -0,65 V zal staan, omdat de diode D2 de maximale negatieve uitgangsspanning op deze waarde begrenst.
De niet-inverterende ingang wordt via een C/R/D-netwerkje met de ingang van de schakeling verbonden. Bovendien gaat deze ingang via de condensator C2 ook nog naar de uitgang van de op-amp.



Een MMV met een op-amp. (© 2025 Jos Verstraten)

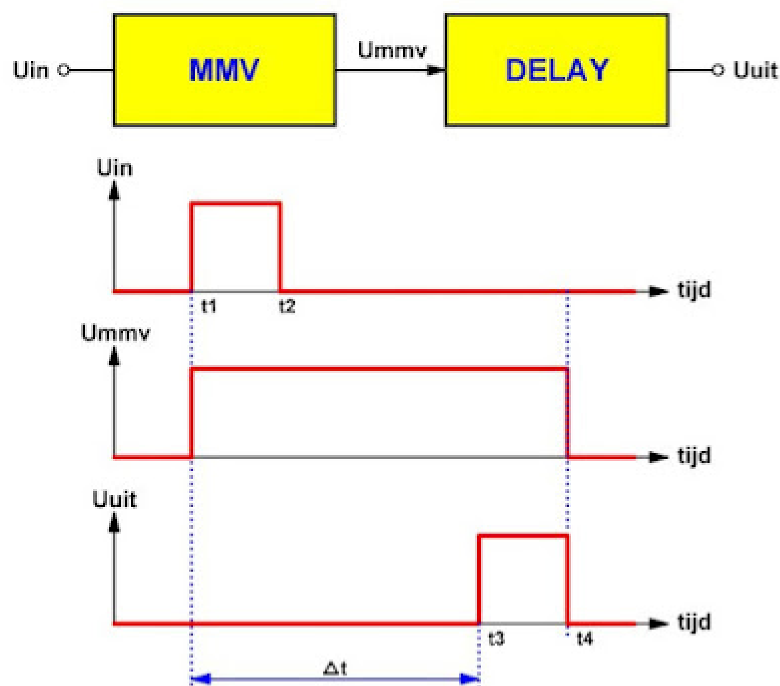
De werking van de schakeling
Aan de ingang U_{in} wordt een smalle positieve puls gelegd. Deze puls zal door het netwerkje C1/R1 worden gedifferentieerd. Dat wil zeggen dat dit netwerkje alleen de snelle veranderingen in het signaal zal doorlaten, dus de voor- en de achterflank. De voorflank wordt omgezet in een zeer smal positief pulsje, de achterflank in een zeer smal negatief pulsje. De diode D1 laat alleen de smalle positieve puls door. Bij het verschijnen van de negatieve puls zal de diode immers sperren.
De smalle positieve puls dringt door tot de niet-inverterende ingang van de operationele versterker. Deze puls zorgt ervoor dat de spanning op deze ingang even groter wordt dan de spanning op de inverterende ingang. Het gevolg is dat de comparator, want ook hier wordt de op-amp als comparator geschakeld, omklapt en de uitgang 'H' wordt.
De condensator C2 vormt echter met de weerstand R2 een differentiator voor deze spanningssprong. Omdat deze condensator echter een zeer grote waarde heeft zal niet alleen de smalle voorflank van de puls op de uitgang teruggekoppeld worden naar de niet-inverterende ingang. De condensator C2 laadt op tot de waarde van de positieve uitgangsspanning en zal deze lading slechts zeer langzaam via de weerstand R2 verliezen. Het gevolg is dat de ontlaadstroom die door deze weerstand vloeit over de weerstand een spanning opwekt.
Daardoor zal de niet-inverterende ingang op een positieve spanning blijven staan, ook na het wegvallen van de smalle positieve puls die door C1/R1 was afgeleid van de voorflank van de ingangspuls.
Naarmate de condensator C2 meer ontlaadt zal de ontlaadstroom kleiner worden. Het gevolg is dat ook de spanningsval over de weerstand R2 steeds kleiner wordt en dus ook de spanning op de niet-inverterende ingang. Op tijdstip t_3 wordt deze spanning gelijk aan de spanning op de inverterende ingang. De comparator klapt om, de uitgang van de schakeling gaat weer naar nul. Op de uitgang ontstaat dus een puls t_1-t_3, waarvan de breedte afhankelijk is van de waarde van de weerstand R2 en de condensator C2.
Door het naar 'L' gaan van de uitgangsspanning zal de integrator R2/C2 weer geactiveerd worden. Deze plotselinge negatieve spanningssprong wordt weer doorgekoppeld en belandt op de niet-inverterende ingang. Maar nu gaat de diode D1 geleiden, die ervoor zorgt dat de

negatieve lading van C2 snel via de kleine weerstand R1 kan afvloeien naar de massa. De spanning op de niet-inverterende ingang gaat dus nu heel snel naar 0 V (t_4). Op dat moment is de schakeling klaar voor het ontvangen van een nieuwe ingangspuls.

De op-amp als pulsvertrager

Twee schakelingen combineren

Een typische toepassing van een monostabiele multivibrator is getekend in de onderstaande figuur. In deze schakeling werkt een MMV samen met de in een vorige paragraaf besproken vertrager. Met deze schakeling kunt u een ingangspuls over een bepaalde tijd Δt vertragen. Het unieke van deze schakeling is dat de ingangspuls reeds verdwenen kan zijn alvorens de uitgangspuls wordt opgewekt. De vertragingstijd kan dus groter zijn dan de duur van de ingangspuls!



Twee op-amp's als pulsvertrager. (© 2025 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling

De werking van de schakeling zal duidelijk zijn. Met behulp van de monostabiele multivibrator wordt de ingangspuls omgezet in een veel bredere puls U_{mmv}. Nadien wordt de voorflank van deze puls vertraagd door de delay. Door een juiste keuze van de tijdvertragende onderdelen kunt u ervoor zorgen dat de uitgangspuls dezelfde breedte heeft als de ingangspuls.

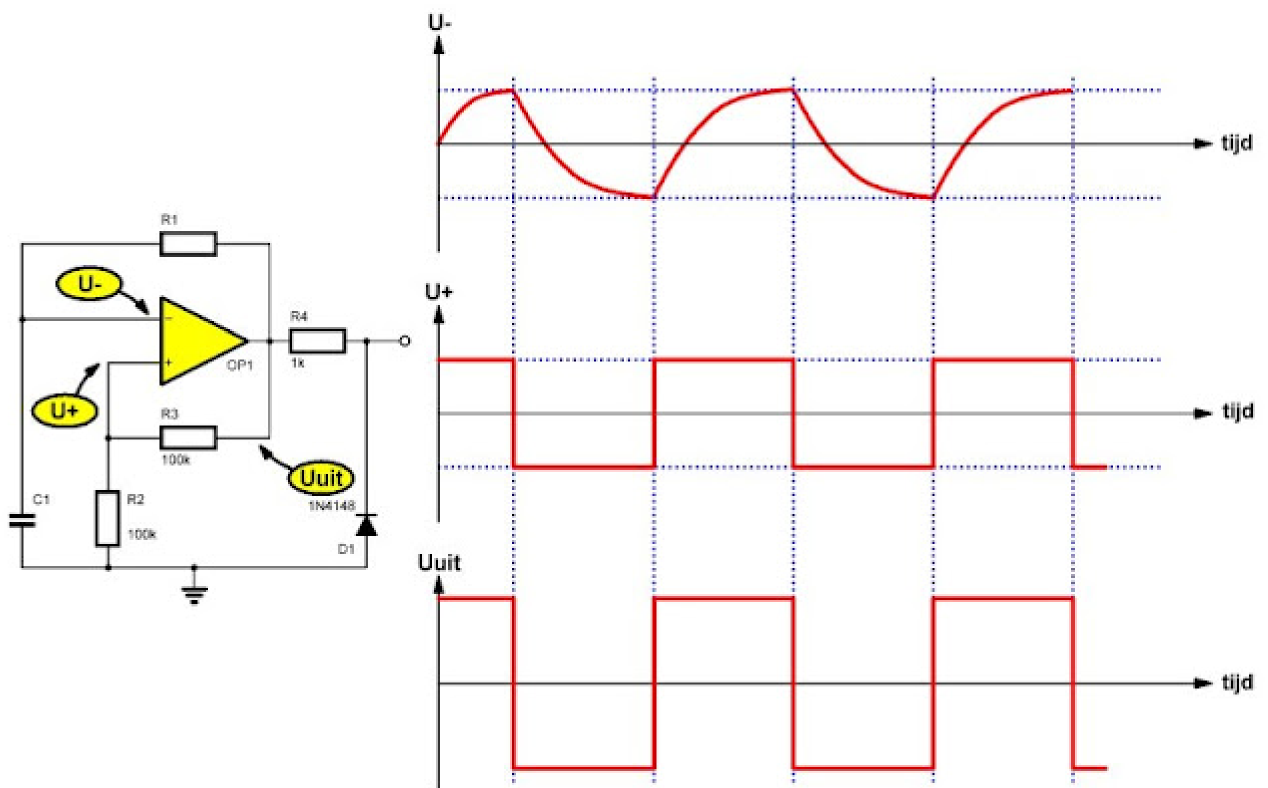
De op-amp als astabiele multivibrator (AMV)

Inleiding

Een astabiele multivibrator (AMV) is een elektronische schakeling die zonder externe beïnvloeding continu schakelt van 'L' naar 'H' en dan weer van 'H' naar 'L'. Dit gebeurt met een bepaalde frequentie waardoor er een periodiek signaal op de uitgang ontstaat. Het is een eenvoudige oscillator die vaak in digitale schakelingen wordt gebruikt om pulsen of kloksignalen te genereren.

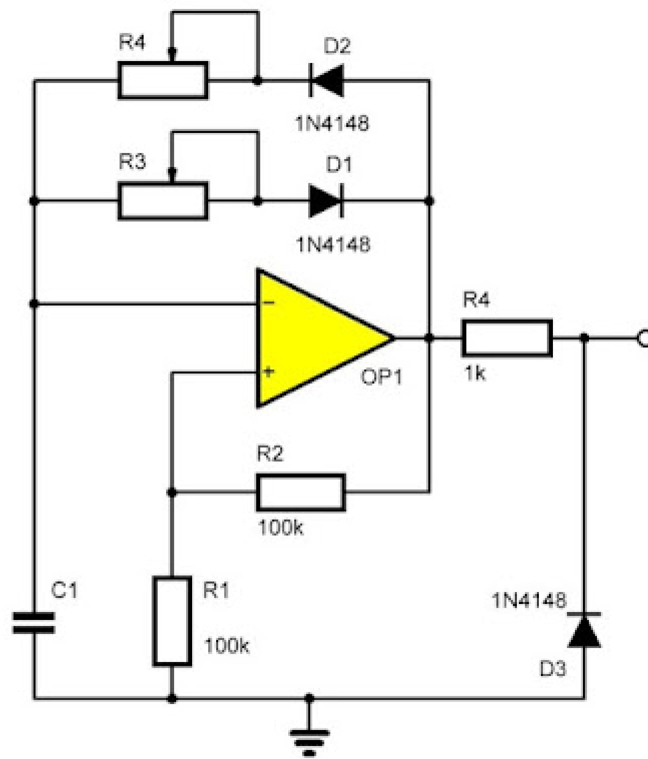
De schakeling met op-amp

De eenvoudigste schakeling met symmetrische voeding is getekend in de onderstaande figuur. U ziet een dubbele terugkoppeling: een resistieve tussen de uitgang en de positieve ingang, een RC-kring tussen de uitgang en de negatieve ingang. De werking van de schakeling volgt uit de rechter grafieken.
Stel dat bij het inschakelen van de voedingsspanning de uitgangsspanning van de op-amp gelijk is aan de positieve voedingsspanning. Door middel van de spanningsdeler R2-R3 zal de helft van deze uitgangsspanning op de positieve ingang terecht komen. De condensator C1 was uiteraard volledig ontladen. De negatieve ingang staat op een negatievere spanning dan de positieve ingang, de uitgangsspanning is inderdaad gelijk aan de positieve voedingsspanning.
De condensator gaat zich opladen via de weerstand R1. De spanning op de negatieve ingang stijgt dus en na een bepaalde tijd wordt deze spanning groter dan de spanning op de positieve ingang. De op-amp klapt om, de uitgangsspanning loopt vast tegen de negatieve voedingsspanning. De positieve ingang wordt ingesteld op de helft van deze spanning. De condensator gaat nu ontladen, R1 is immers op een zeer negatieve spanning aangesloten. Na een bepaalde tijd wordt de spanning op de negatieve ingang kleiner dan de spanning op de positieve ingang, de op-amp klapt weer om.
Het netwerkje R4-D1 zorgt weer voor het aanpassen van de uitgangsspanning van de op-amp aan de vereisten van digitale CMOS-schakelingen.



Een eenvoudige AMV rond een op-amp. (© 2025 Jos Verstraten)

Uitbreiding naar instelbare pulsbreedte
De schakeling van bovenstaande figuur wekt een ongeveer symmetrische blokgolf op. Het tijdinterval 'H' is ongeveer gelijk aan het tijdinterval 'L'. Voor sommige toepassingen kan dat bezwaarlijk zijn. Met enige kleine uitbreidingen kunt u de schakeling omvormen tot een pulsgenerator, die smalle positieve of negatieve pulsjes kan opwekken. Het universele schema van een pulsgenerator met een op-amp is getekend in onderstaande figuur.



Een eenvoudige pulsgenerator rond een op-amp.
(© 2025 Jos Verstraten)

Door middel van twee dioden wordt het laden en ontladen van de condensator afzonderlijk geregeld door twee weerstanden R3 en R4. Als de uitgangsspanning van de op-amp positief is, dan zal D1 sperren en D2 geleiden. Door deze laatste diode vloeit dan de laadstroom, waarvan de grootte wordt bepaald door de waarde van de weerstand R4. Als de uitgang negatief is, dan spert D2 en gaat D1 geleiden. De condensator wordt dan ontladen door de weerstand R3. Op deze manier kunt u de breedte van de 'L'-periode en van de 'H'-periode individueel instellen.